

Ecole Doctorale 139
Connaissances, Langages, Modélisation
THÈSE

Présentée

en vue de l'obtention du

grade de Docteur

de

l'Université Paris Ovest Nanterre La Défense

en Sciences pour l'Ingénieur

Astrid RUBIANO FONSECA

Smart control of a soft robotic hand prosthesis
Contrôle intelligent d'une prothèse de main robotique
souple

soutenue le 9 December 2016 devant le jury composé de :

C. LASCHI	Prof., Scuola Superiore Sant'Anna, Pisa	Rapporteur
Y. Aoustin	Prof., Ecole Centrale de Nantes	Rapporteur
T. WALLMERSPERGER	Prof., Dr.-Ing, Technische Universität Dresden	Examinateur
P. WENGER	Prof., Ecole Centrale de Nantes	Examinateur
N. JOUANDEAU	MCF HDR, Université Paris 8	Examinateur
M. D'OTTAVIO	MCF, Université Paris Ovest Nanterre La Défense	Examinateur
L. GALLIMARD	Prof., Université Paris Ovest Nanterre La Défense	Directeur
O. POLIT	Prof., Université Paris Ovest Nanterre La Défense	Directeur

Laboratoire Énergétique Mécanique Électromagnétisme

LEME - EA 4416

50 rue de Sèvres - 92410 Ville d'Avray

Sommaire

La manipulation d'objets est depuis longtemps un sujet qui suscite beaucoup d'intérêt dans de nombreuses disciplines dont notamment la médecine, la biomécanique et la robotique. En robotique dans un but d'optimisation des procédés industriels, cet intérêt a principalement conduit au développement de robots industriels dont l'automatisation fut pendant longtemps le premier objectif mais dont l'interaction et la coopération avec un ou plusieurs opérateurs sont aujourd'hui devenus les nouveaux objectifs. En particulier, de nombreux bras et de nombreuses pinces robotiques ont été développés durant les vingt dernières années dans le but : (i) de remplacer l'intervention humaine en environnement dangereux, (ii) ou d'accélérer et d'améliorer la précision industriels de production. Ces développements ont suscité de nombreuses études caractérisant les critères de fabrication des mains robotiques principalement selon deux axes de recherche qui sont le contrôle commande des actionneurs et des opérations à réaliser, ainsi que l'étude des mécanismes et le développement d'actionneurs et de combinaisons d'actionneurs pour la préhension (cf. Figure 1).

Le premier axe de recherche du domaine de la robotique concerne le développement des techniques de contrôles et des stratégies d'automatisation afin d'améliorer les performances des robots et des interfaces homme-machine permettant de les utiliser.

Le deuxième axe de recherche du domaine de la robotique concerne l'analyse, l'amélioration et la conception des mécanismes des actionneurs et des matériaux utilisés dans les robots, l'amélioration des capacités de manipulations agiles des mains robotiques. Avec les nouvelles tendances d'interaction et de coopération, les secteurs de la réhabilita-

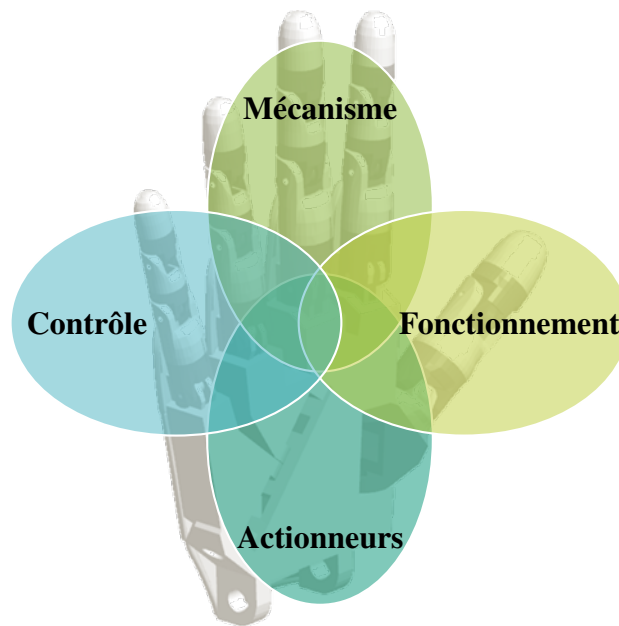


FIGURE 1 – Les deux principaux axes de recherche sur les main robotiques.

tion et dans l'amélioration des capacités de préhension apparaissent.

L'utilisation conjointe de matériaux intelligents et de matériaux mous a conduit au développement de nouveaux appareils adaptatifs, qui s'insèrent dans le domaine de la robotique douce. Ces nouveaux appareils du fait de leur adaptabilité et de leur flexibilité peuvent être utilisés pour la réhabilitation ou l'amélioration des capacités physiques du corps humain. L'idée principale de la robotique douce est de construire des robots bio-inspirés ayant des capacités qui permettent, à partir d'informations incomplètes, des interactions adaptatives et souples. La manipulation agile dans le contexte du développement de prothèses de main est un problème à information incomplète car bien que la tâche soit clairement définie (*i.e.* la manipulation d'objets), les conditions de fonctionnement sont inconnues (*i.e.* la taille, la forme, le poids de l'objet).

Les prothèses de main robotique actuelles sont : Bebionic Hand 3 [1], i-limb Ultra [2] et Michelangelo [3], (cf Figure 2) Ces prothèses, bien que récentes, sont rigides, non adaptables et suivent une approche qui consiste à imiter au mieux la main humaine. Cependant, elles négligent une approche fonctionnelle de la main humaine qui devrait être l'objectif principal dans la réhabilitation des patients amputés. Par conséquent, le déve-



(a) Bibionic main [1]



(b) i-limb main [2]



(c) Michelangelo main [3]

FIGURE 2 – Principaux main robotiques.

loppement d'appareils adaptables à partir d'une approche bio-inspirée prenant en compte non seulement les mécanismes de la main mais aussi de sa fonctionnalité est cruciale pour progresser dans le développement de nouvelles prothèses de mains robotiques [4, 5]. C'est pourquoi la robotique douce constitue une approche intéressante pour la conception de telles prothèses. L'avantage principal de la robotique douce pour la manipulation agile est la capacité d'adaptation qui permet à la main robotique d'être utilisée dans différentes situations de préhension lorsque l'environnement est incertain. Cependant certains verrous doivent être surmontés. Le premier verrou concerne la conception d'un mécanisme robotique suffisamment flexible pour attraper des objets de formes et de tailles différentes mais suffisamment rigide pour accomplir l'action de préhension de manière stable. Le second verrou concerne le développement d'actionneurs souples permettant de reproduire l'action musculaire qui constitue un challenge majeur dans la conception de robots mous pouvant se déformer et moduler leur rigidité au cours de leur mouvement [6].

Par conséquent, le sujet principal de cette thèse est le développement d'un contrôle commande intelligent pour une prothèse de main robotique avec des parties souples qui comporte :

- (i) une interface homme-machine permettant de contrôler notre prothèse,
- (ii) et des stratégies de contrôle améliorant les performances de la main robotique.

Notre approche tient compte :

- (i) du développement d'une interaction intuitive entre l'homme et la prothèse facilitant l'utilisation de la main, d'un système d'interaction entre l'utilisateur et la main reposant sur l'acquisition de signaux ElectroMyoGrammes superficiels au moyen d'un dispositif placé sur l'avant-bras du patient. Les signaux obtenus sont ensuite traités avec un algorithme basé sur l'intelligence artificielle, en vue d'identifier automatiquement les mouvements désirés par le patient.
- (ii) du contrôle de la main robotique grâce à la détection du contact avec l'objet et de la théorie du contrôle hybride.

Ainsi, nous concentrons notre étude sur :

- (i) l'établissement d'une relation entre le mouvement du membre supérieur et les signaux signaux ElectroMyoGrammes superficiels, (ii) les séparateurs à vaste marge pour classer les patterns obtenues à partir des signaux signaux ElectroMyoGrammes superficiels correspondant aux mouvements de préhension, (iii) le développement d'un système de reconnaissance de préhension à partir d'un dispositif portable MyoArmbandTM [7], (iv) et des stratégies hybrides de contrôle commande de force-position de notre main robotique souple.

Dans ce contexte, nous apportons les contributions suivantes : (i) la prise en considération des signaux ElectroMyoGrammes superficiels produits lors du mouvement, (ii) l'analyse du comportement de cinq caractéristiques des signaux ElectroMyoGrammes inhérents à la flexion et l'extension du membre supérieur, en considérant la position et la vitesse des articulations au cours du mouvement, (iii) un critère permettant de sélectionner le meilleur groupe de caractéristiques, (iv) l'utilisation des séparateurs à vaste marge pour classer les patrons des signaux ElectroMyoGraphiques superficiels pendant le mouvement, (v) un schéma de classification efficace pour distinguer les gestes du membre supérieur, (vi) un nouveau modèle de détection de mouvement précis permettant la détection et l'identification de deux mouvements de la main (ouverture et fermeture) en temps réel, au moyen de la mesure de l'entropie et du flux entropique, déterminant automatique-

ment le début du mouvement et identifiant grâce aux séparateurs à vaste marge les patrons de préhension, (vii) développement d'une interface capable d'identifier deux mouvements de préhension en dehors des conditions de laboratoire, (viii) conception d'un nouveau capteur tactile de force intelligent, (ix) caractérisation et modélisation du comportement du capteur tactile pour différentes conditions d'utilisation, (x) et la proposition d'un modèle de contrôle commande hybride permettant de contrôler la position du doigt et la force au bout du doigt robotique.

Dans le premier chapitre, nous présentons un état de l'art des méthodologies utilisées pour la séparation des mouvements à partir des signaux ElectroMyoGrammes (sEMG) en résumant plusieurs recherches. Les informations sont divisées par type de mouvement (flexion/extension, radial/ulnaire, pronation/supination) incluant principalement les gestes de la main humaine, les articulations (coude, poignet et doigt), les muscles et le type de patient (amputé ou non). Nous avons trouvé les muscles les plus utilisés suivant le type de mouvement pour des patients amputés et en bonne santé. De plus, nous avons classé les méthodologies précédemment considérées dans quatre catégories : (i) une seule caractéristique et un seul classificateur, (ii) une seule caractéristique et plusieurs classificateurs, (iii) plusieurs caractéristiques et un seul classificateur, (iv) plusieurs caractéristiques et plusieurs classificateurs.

Dans chaque catégorie nous détaillons la précision de la classification obtenue et le type de patient considéré. Ensuite, nous nous concentrons sur les caractéristiques examinées par les auteurs et nous montrons les plus utilisées à partir desquelles nous en avons sélectionné cinq. Nous avons également proposé un modèle cinématique du membre supérieur en considérant une position initiale préétablie. Le modèle décrit les angles formés par les articulations et calcule leurs vitesses. À partir du modèle précédemment décrit, nous analysons l'influence de la cinématique du mouvement sur les caractéristiques extraites des signaux ElectroMyoGrammes, dans le but de comprendre comment les caractéristiques sont affectées par la façon dont le mouvement est exécuté. Ensuite, nous proposons un critère pour sélectionner la meilleure combinaison des caractéristiques. Le critère tient compte de la distance euclidienne pour mesurer la séparation entre le groupe de caracté-

ristiques. Par conséquent, la sélection des caractéristiques a un rôle prépondérant dans le schéma de classification.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons un cadre applicatifs des machines à vaste marge (abrégé SVM pour Support Vector Machine), pour la classification des mouvements des membres supérieurs. Nous présentons l'état de l'art des études existantes du domaine de l'étude et du traitement des mouvements des membres supérieurs par les signaux sEMG. Nous introduisons une classification SVM dans laquelle nous considérons un hyperplan avec une marge de séparation optimale. La solution proposée est assimilée à un problème d'optimisation en exploitant les notions de marge souple et de fonction noyau. Afin d'évaluer le classifieur proposé, nous présentons une expérimentation intégrant capture et suivi des mouvements à l'aide de signaux sEMG sur un ensemble d'individus pour un ensemble de mouvements prédéfinis.

Dans le troisième chapitre, nous présentons un modèle de reconnaissance de préhension au travers de signaux sEMG acquis par utilisation d'un dispositif portatif MyoArmband TM. Après un état de l'art des solutions existantes utilisant un dispositif équivalent, nous présentons un nouveau modèle de détection et d'identification des mouvements caractérisé par des relations entre la cinématique des membres supérieurs et les signaux sEMG associés. Les résultats démontrent l'efficacité de la solution proposée sous contrainte de calcul en temps réel, pour les mouvements de la main et permettant ainsi d'obtenir une interprétation naturelle des mouvements désirés de notre prothèse de main robotique nommée ProMain 1. L'interprétation appropriée et intelligente des signaux sEMG nous permet d'identifier les actions désirées au travers de trois étapes d'extraction des informations : (i) la modélisation des signaux sEMG attendus, (ii) l'identification des mouvements et des actions, (iii) et la reconnaissance des modèles de préhension reproductibles par la prothèse de main utilisée.

Dans le quatrième chapitre, nous présentons les modes et les stratégies de contrôle commande de notre main robotique ProMain-I. Nous commençons par énumérer en détails les caractéristiques, qui implique un capteur de force intelligent développé pendant cette thèse. Nous poursuivons par la caractérisation de matériaux flexibles utiles pour la

réalisation de parties molles, propres à la robotique douce. Nous proposons ensuite un modèle paramétrique du doigt robotique qui comprend : (i) un modèle paramétrique de l'actionneur au niveau connexion entre les phalanges, (ii) l'identification expérimentale de l'actionneur et son système de contrôle commande, (iii) et l'identification des doigts robotisés, y compris en position et en force par rapport aux positions et forces désirés en bout de doigt.

Sur la base de ces modèles, nous décrivons un nouveau contrôleur de doigt optimisé, en tenant compte du mouvement et de la force estimés pour obtenir un contrôleur hybride en position et en force. Après une présentation globale de la prothèse ProMain-I, de son dimensionnement et des implications entre capteurs et actionneurs, nous présentons l'interface logicielle utilisée. Ensuite le protocole expérimental utilisé est décrit et mis à l'épreuve dans une expérimentation impliquant différents sujets.

Titres des chapitres

Les titres sont les suivants :

1. Mise en relation des mouvements du membre supérieur avec des signaux ElectroMyoGrammes superficiels.
2. Classification des mouvements basée sur des signaux ElectroMyoGrammes superficiels.
3. Reconnaissance embarquée des mouvements de préhension de la main.
4. Contrôle de la main robotique souple ProMain-I
5. Design et conception de la main robotique souple ProMain-II

Dans le sens de l'évaluation des comportements spécifiques de l'activité EMG des muscles des membres supérieurs en relation directe avec leur signaux sEMG, nous avons développé une nouvelle approche permettant d'établir une relation directe entre les caractéristiques des signaux sEMG et la cinématique des mouvements des membres supérieurs. Par ailleurs, afin de maximiser les distances entre les éléments correspondants aux différents signaux sEMG, nous proposons comme critères de choix les valeurs suivantes : (i) la

valeur absolue moyenne, (ii) la valeur moyenne, (iii) la valeur harmonique, (iv) l'entropie, (v) et la fréquence moyenne.

Dans une optique d'identification d'un couple de critères discriminants, nous proposons de combiner l'entropie et la fréquence moyenne qui selon nos expérimentations, donne les meilleurs résultats. De plus, les valeurs maximales de ces caractéristiques sont utiles pour des signaux sEMG d'une durée de 1 à 2 m/s, ce qui permet d'utiliser ces critères avec des fréquences d'acquisition peu importantes, ce qui est un point important pour des considérations de traitement temps réel avec des capacités de calculs restreintes. Ces différents points montrent le potentiel d'utilisation des critères de choix proposés dans le contrôle temps réel d'une main de prothèse à l'aide de sEMG. L'identification des mouvements des membres supérieurs est prévue pour être réalisée en ligne, soit pendant l'exécution de mouvements continus et à partir des signaux sEMG produits. Le schéma produit consiste à : (i) extraire les caractéristiques de sEMG produites pendant le mouvement, (ii) normaliser les caractéristiques captées, (iii) exécuter une classification SVM linéaire ou non linéaire avec des valeurs optimisées σ et C permettant d'identifier les mouvements avec précision (cf Figure 3). En outre, le modèle proposé peut être utilisé pour des personnes amputés dans le cadre du contrôle commande des prothèses et pour des personnes en téléopération dans le cadre du contrôle commande de manipulation d'objets avec précision à distance.

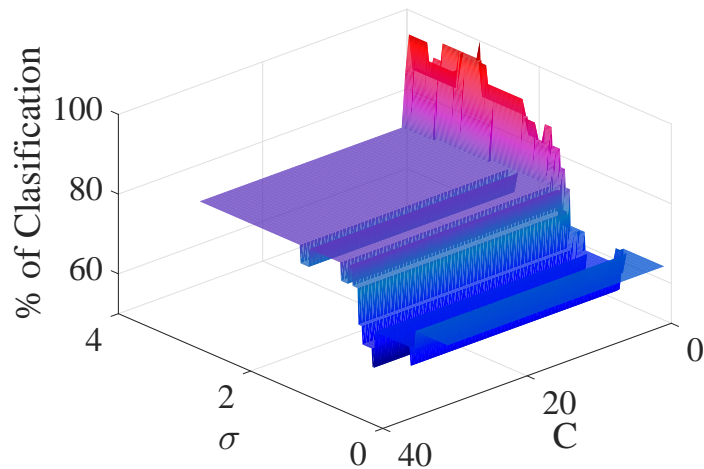


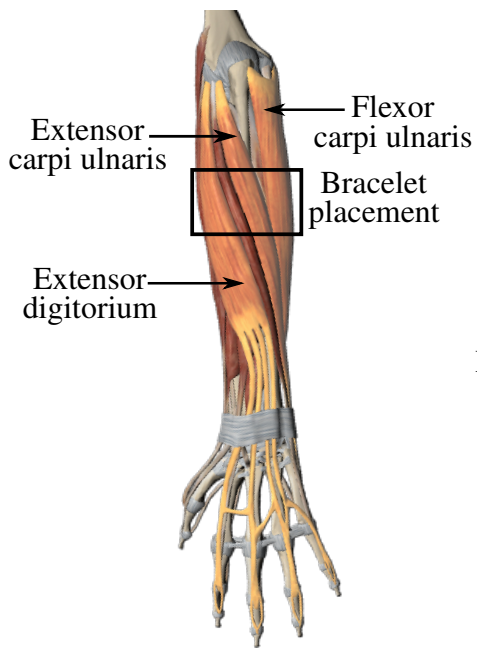
FIGURE 3 – Classification σ and C .

Les périphériques portables [8–12] intégrés à encombrement très réduit (appelés wearable devices) sont un des domaines technologiques naissant qui modifient grandement les possibilités des interfaces homme-machine à venir. Dans le cadre de cette étude, nous avons évalué un dispositif MyoArmbandTM, voir la Figure 4, afin de proposer dans un cadre d’application temps réel.



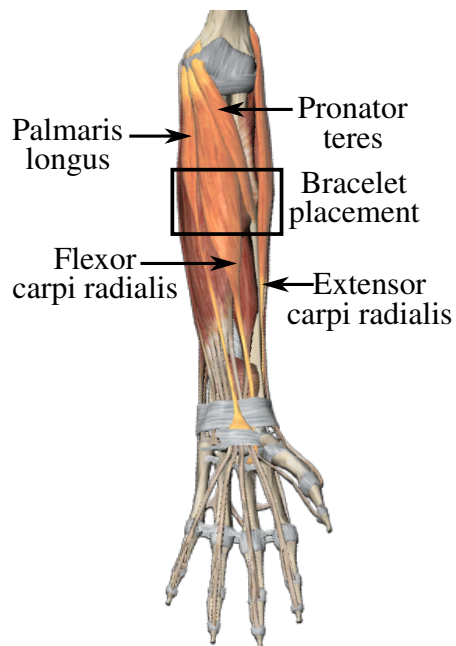
FIGURE 4 – Myo armband sEMG.

Le diapositive est directement connecte a la avant-bras du patient, par conséquence, les les muscles (voir la Figure 5a) que nous utilisons sont : (i) Extensor carpi radialis longus, (ii) Palmaris longus, (iii) Flexor carpi radialis, (iv) Flexor carpi ulnaris, (v) Pronator teres, and (vi) Extensor carpiradialis.



(a) Muscles frontal.

La Figure 5b présente la forme des signaux obtenus



(b) Muscles postérieure.

par le dispositif de captation

Les signaux pour el dispositif ont la forma qui se illustre dans la Figure 6.

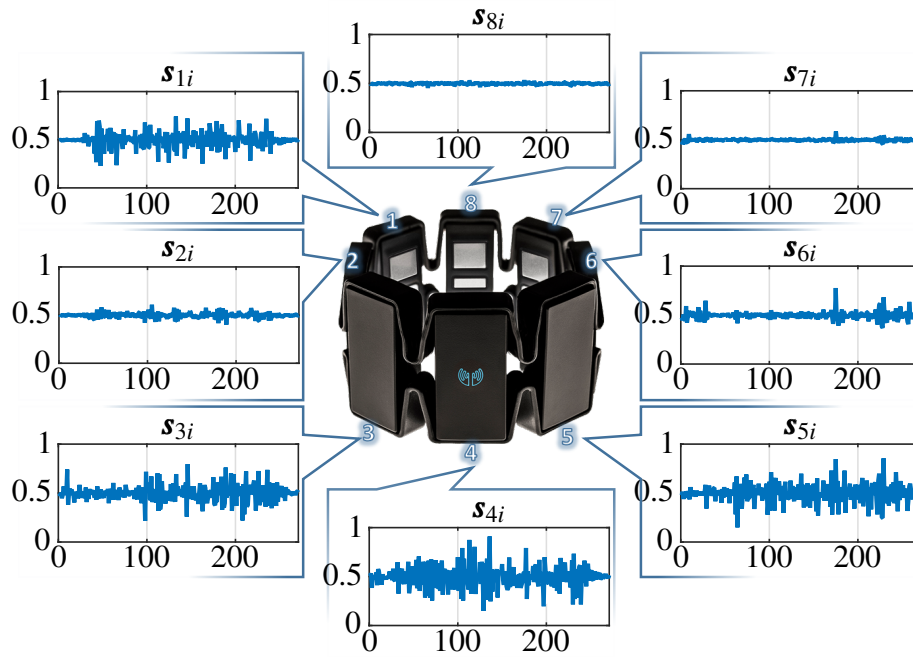


FIGURE 6 – Signaux sEMG capturés à partir de MyoArmband™.

Ensuite nous avons développé l'algorithme qui est présente en la Figure 7.

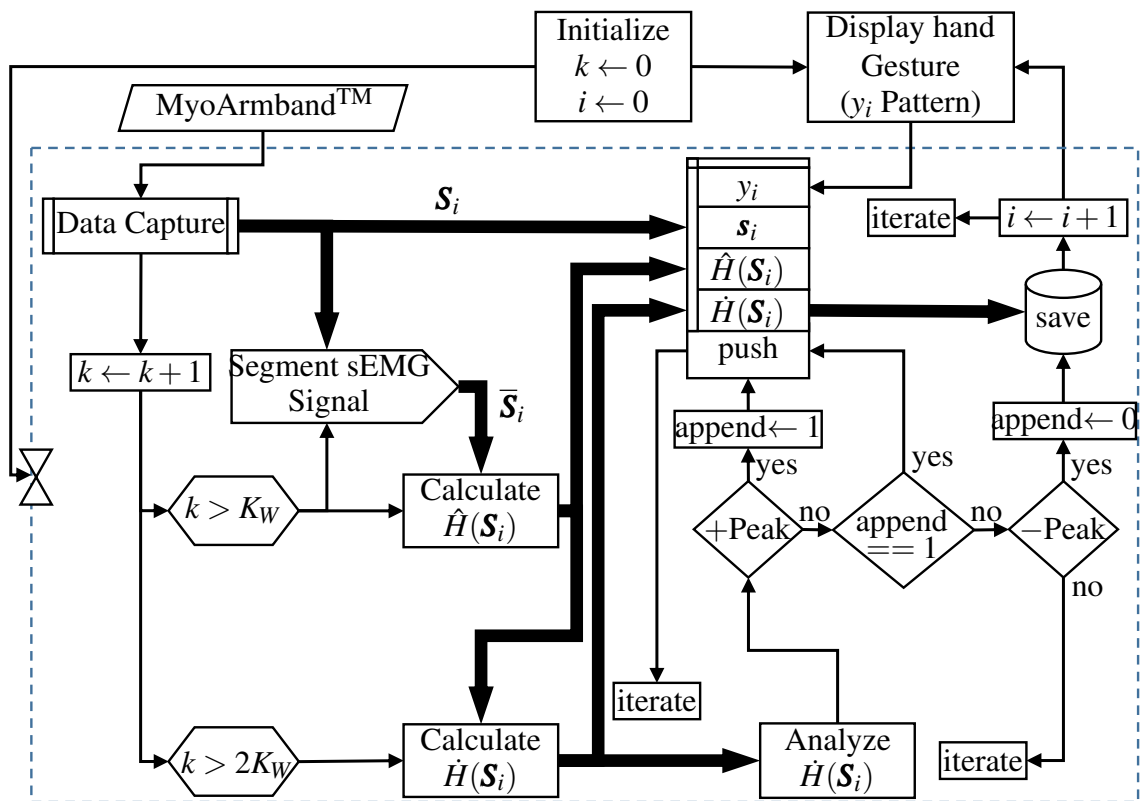


FIGURE 7 – Capture des patrons.

La méthodologie proposée a les étapes suivantes : (i) un nouveau modèle à détection des mouvements en définissant dynamiquement le début du signal et sans présupposition de début de signal, par mesure de l'entropie et des variations de l'entropie dans le temps, (ii) et le schéma de classification des gestes de saisie en utilisant l'entropie et par classification SVM.

De plus, nous avons développé une nouvelle interface homme-machine (voir la Figure 8) permettant de tracer en temps réel en laboratoire l'activité des patients et le retour du processus d'identification des gestes de la main.

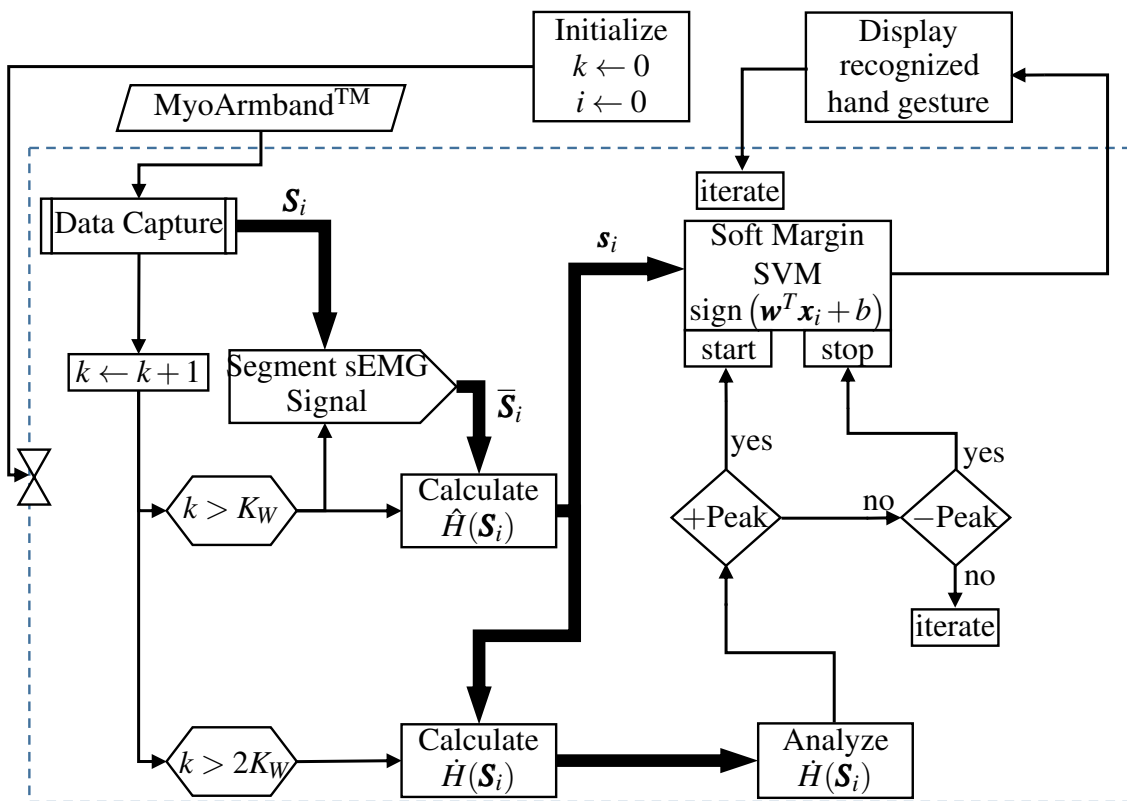


FIGURE 8 – Classification des patrons.

Cette interface homme-machine a été réalisée à l'aide d'une plateforme embarquée possédant une capacité de calculs réduite. La Figure 9 illustre la procédure expérimental que nous avons suivie.

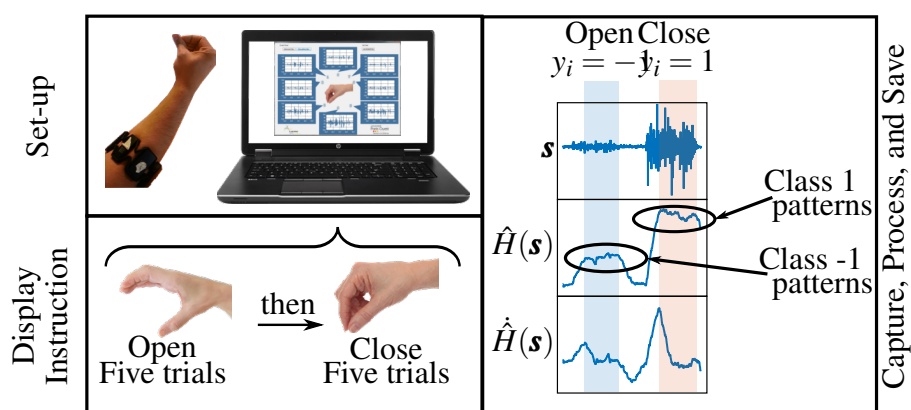


FIGURE 9 – Résumé expérimentale.

Dans un premier temps, nos travaux sont illustrés par la construction et la mise au point de la prothèse de main appelée ProMain-I (voir la Figure 10). La main robotique résultante est équipée d'un nouveau capteur tactile intelligent qui permet de connaître la force appliquée par les doigts. De plus, nous présentons la caractérisation du capteur (voir

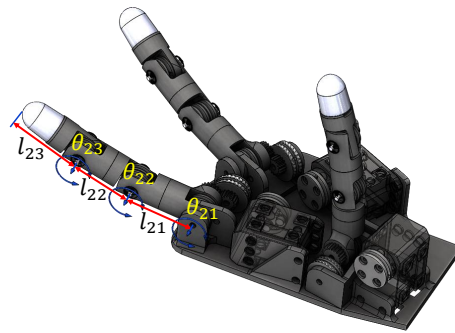
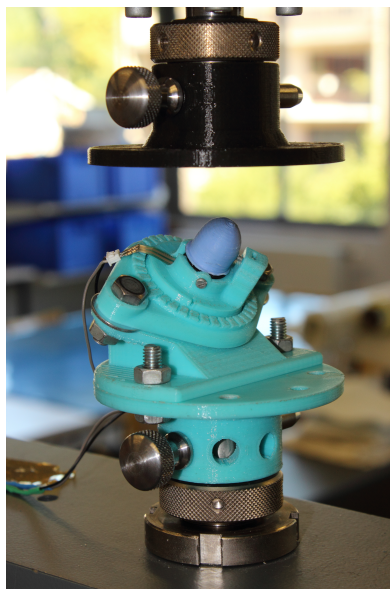
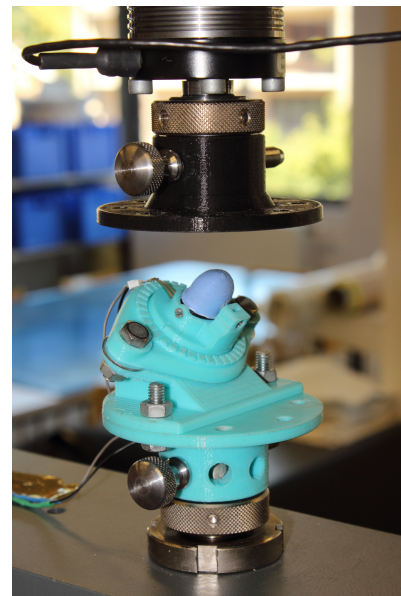


FIGURE 10 – ProMain-I Hand avec des angles θ_{ji} and phalanges l_{ji} .

la Figure 11) dans des différentes conditions opérationnelles (voir la Figure 12a and 12b). Notre étude a permis d'établir la relation entre la force appliquée constatée et la force d'application désirée.



(a) Support but de doigt sans rotation.



(b) Support but de doigt avec rotation = 40°.

FIGURE 12 – Support de bout de doigt.

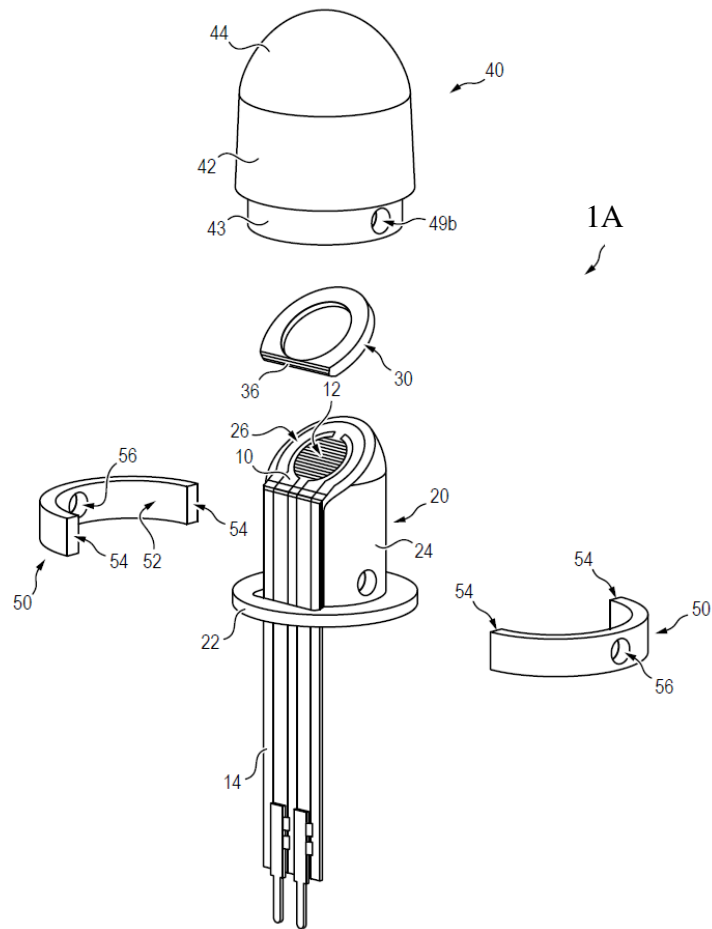


FIGURE 11 – Capteur intelligent tactile.

Nous proposons les modèles suivants : (i) un modèle paramétrique pour la main ProMain-I qui utilise des servomoteurs comme actionneur, voir la Figure 13, (ii) un modèle expérimental permettant de définir la position du doigt et la force du doigt, voir la Figure 14, (iii) et un modèle hybride contrôlant simultanément position et force des doigts, voir la Figure 15.

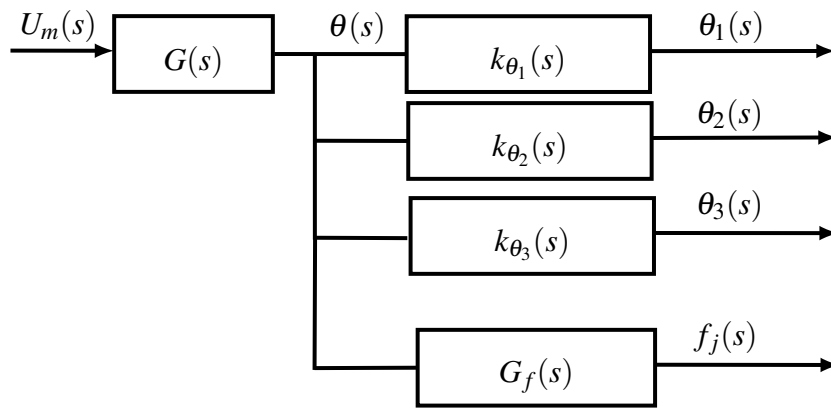


FIGURE 13 – diagramme de blocs.

En conséquence, la synergie entre les modèles proposés permet à la prothèse de main résultante d'effectuer des gestes de saisie de façon régulière et précise.

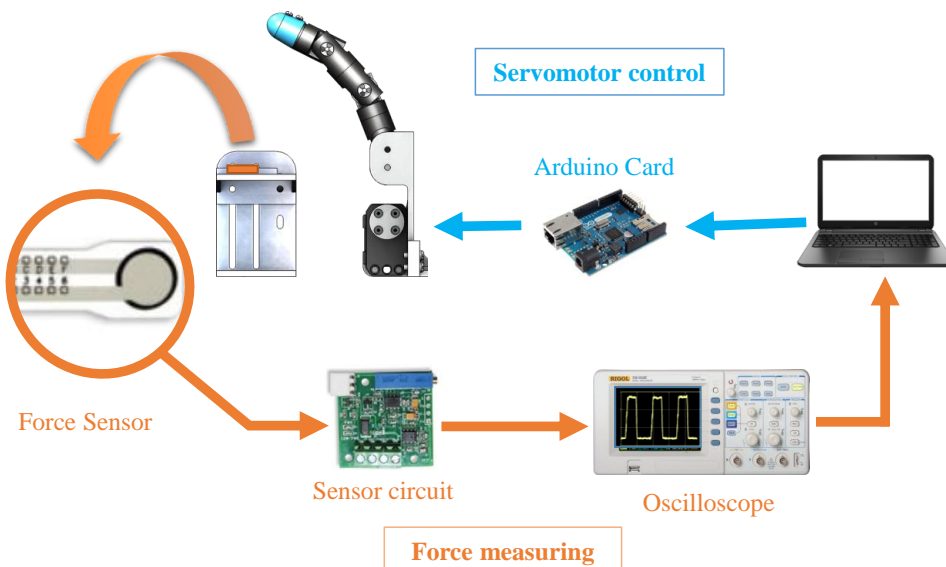


FIGURE 14 – Expérience but de doigt.

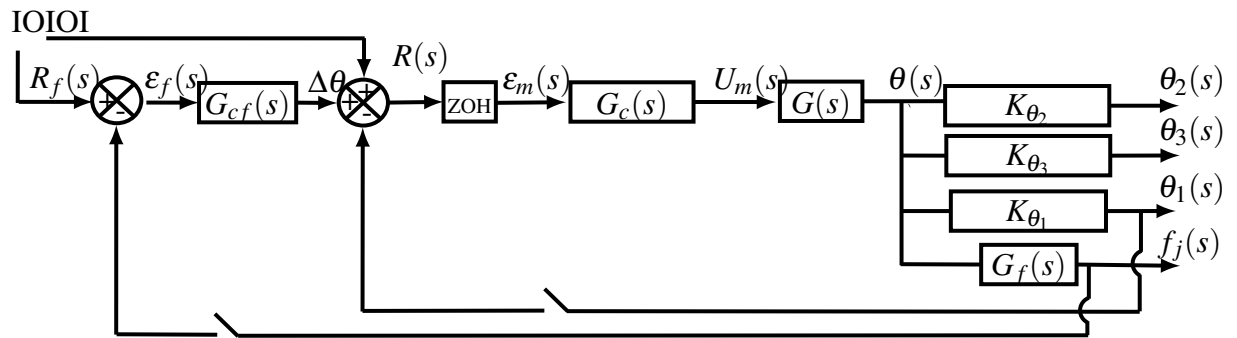


FIGURE 15 – diagramme de blocs de contrôle commande ProMain-I.

Dans un deuxième temps, nos travaux sont illustrés par la construction et la mise au point de la prothèse de main appelée ProMain-II voir la Figure 16, qui possède de nouvelles caractéristiques et des liaisons souples au niveau de la jointure entre les deux dernières phalanges des doigts. Les différentes expériences menées pour évaluer ce deuxième prototype de prothèse démontrent l'intérêt de la liaison souple dans la gestion du contact avec les objets à manipuler ainsi que dans l'adaptabilité de la prothèse aux objets au fil des manipulations.

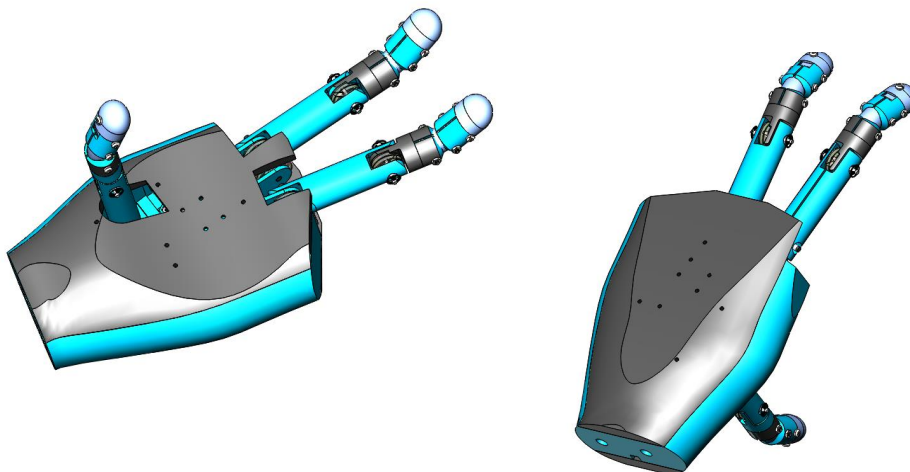


FIGURE 16 – ProMain-II.

En perspectives, d'autres recherches pourraient également être menées pour valider

les méthodes proposées chez les patients amputés au niveau des membres inférieurs ou avec des liaisons plus relatives des muscles voir de l'émission des signaux sEMG, avec ou sans sensation dite fantôme. De plus, l'intégration d'autres capteurs dans le système actuel de classification SVM (tels que les unités de mesures inertielles) pourrait être une approche intéressante pour l'évaluation des mouvements des personnes en interaction avec des ordinateurs. Une perspective importante et intéressante concerne les possibilités d'augmentation du nombre de mouvements détectés à l'aide de la classification par motif au travers de l'identification de nouveaux critères, de nouveaux couples ou encore de classification dans des espaces de critères de plus grande taille.

En outre, la deuxième prothèse de main ProMain-II, qui est composée d'alliages à mémoire de forme (SMA), nécessite l'élaboration d'une stratégie de contrôle incluant le contrôle de ces matériaux intelligents. L'objectif étant de permettre l'adaptation de la rigidité des tendons permettant de contrôler flexion et extension des doigts, il s'agit de définir des comportement de contrôle en force et en position tenant compte : (i) du contrôle de position avec des perturbations issues de la rigidité, (ii) du contrôle de la force avec des perturbations issues des changements de rigidité, (iii) et également de la rétroaction de la raideur sur les fils SMA de commande.

L'utilisation de matériaux IPMC est également une piste possible dans les matériaux intelligents potentiellement utilisables dans la conception de mécanisme d'actionnement et d'entraînement. En outre, la modification de la rigidité de la liaison souple de la deuxième prothèse de main ProMain-II est modifiable plus simplement par variation des schémas d'impression et des taux de remplissage de matière dans l'impression 3D utilisée. Dans ce sens, il est possible de limiter la flexion et même de restreindre le mouvement des matériaux souple selon certains axes ou directions souhaités.

Les prototypes des prothèses ProMain restent à évaluer chez des patients amputés pour tester l'acceptabilité, les implications médicales et psychologiques. Cette étude doit être développée dans un contexte interdisciplinaire et le résultat est précieux pour améliorer les possibilités des prothèses développées dans nos travaux afin de produire des dispositifs de réadaptation conformes aux attentes des patients.

Brevets d'invention

Chaîne articulée pour une prothèse robotique comprenant une jonction souple

L'invention concerne une chaîne articulée (1), formant notamment tout ou partie d'un doigt ou d'un bras ou d'une patte ou d'un manipulateur, ladite chaîne articulée (1) comprenant un premier membre (10), un deuxième membre (20) et une jonction souple (30), le premier membre (10) et le deuxième membre (20) étant chacun fixés à la jonction souple (30) qui est réalisée dans un matériau présentant une dureté Shore A comprise entre 0 et 50.

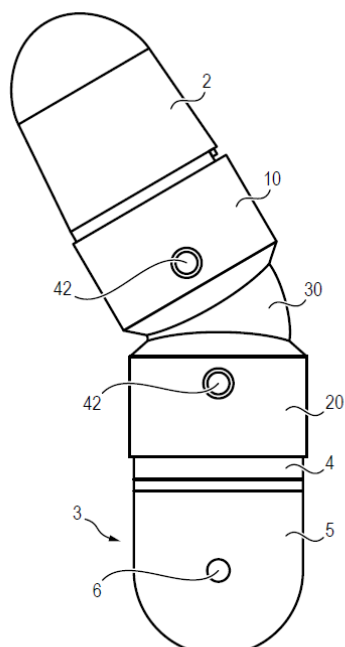


FIGURE 17 – Vue de côté d'un exemple de réalisation d'une chaîne articulée pour un doigt d'une prothèse robotisée correspondant à 5 une main.

Capteur tactile capable de retranscrire le toucher

L'invention concerne un capteur tactile (1) comprenant :

- un transducteur (10) fixé sur un support (20) sur lequel est fixé le transducteur (10), et

-
- o une enveloppe (40) déformable comprenant un corps (42), fixé sur le support (20) et un capuchon (44) et fixé sur le corps (42) de manière à recouvrir le transducteur (10),

dans lequel le capuchon (44) présente une face d'actionnement (46) configurée pour venir en regard du transducteur (10), la zone centrale (47) de la face d'actionnement étant plus proche du transducteur (10) que sa zone périphérique (48) de sorte que la face d'actionnement (46) vient en localement contact avec le transducteur (10) au niveau de la zone centrale (47) lorsqu'une force est appliquée sur le capteur tactile (1).

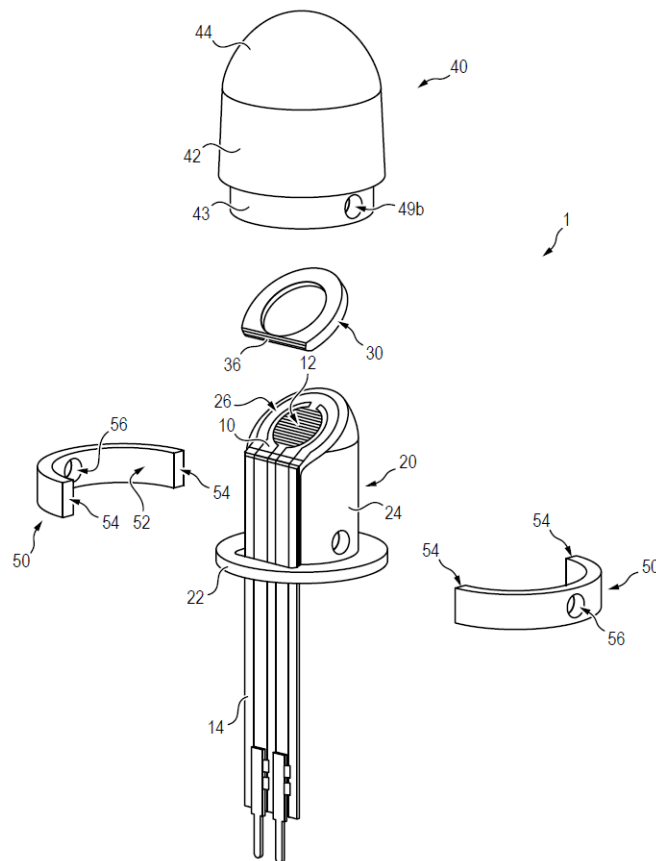


FIGURE 18 – Vue éclatée d'un exemple de réalisation du capteur tactile conforme à l'invention.

Chaîne articulée comprenant un unique actionneur et ensemble de chaînes articulées associées

L'invention concerne une chaîne articulée (1) comprenant une phalange proximale (10), une phalange médiale (20) et un actionneur (3) configuré pour mettre en rotation la phalange proximale (10), la chaîne articulée (1) comprenant en outre :

- une poulie proximale (12), montée sur une extrémité proximale (10a) de la phalange proximale (10),
- une première poulie médiale (22), montée sur une extrémité proximale (20a) de la phalange médiale (20), et
- au moins un premier câble d'actionnement proximal (14) fixé d'une part sur la poulie proximale (12) et d'autre part sur la première poulie médiale (22) afin d'actionner la phalange médiale (20), de sorte que l'actionnement de la poulie proximale (12) par l'actionneur (3) a pour effet de déplacer la phalange médiale (20) par rapport la phalange proximale (10).

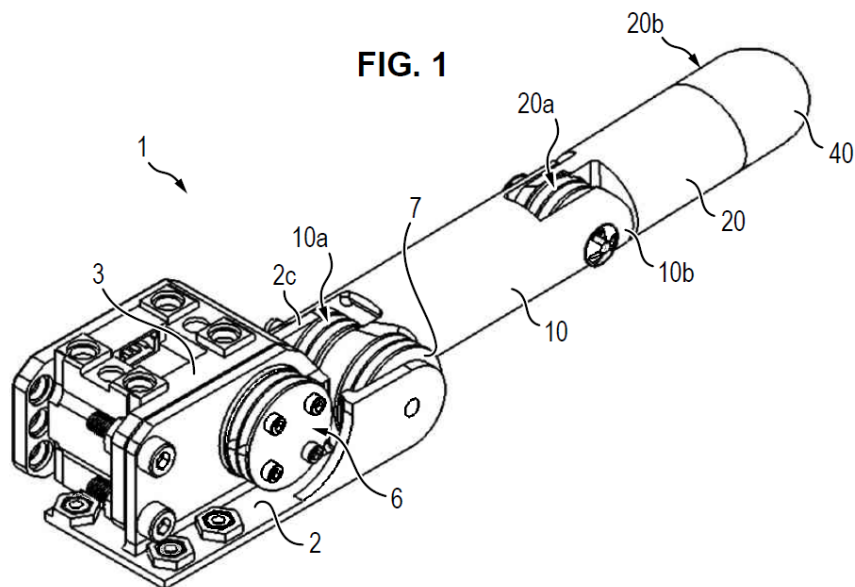


FIGURE 19 – vue en perspective d'un premier exemple de réalisation d'une chaîne articulée conforme à l'invention, sur laquelle les câbles d'actionnement ont été omis.

Bibliographie

- [1] Steeper. *bebionic Technical Manual*. 3619 Paesanos Parkway, Suite 200, San Antonio TX 78231 USA, 2 edition, 2015.
- [2] touch bionics. *i-limbTMultra Clinician Manual*. 35 Hampden Road Mansfield MA 02048 USA, 2 edition, Mar 2013.
- [3] Ottobock. *The Michelangelo®Hand in Practice*. Max-Näder-Straße 15, 37115 Duderstadt/Germany, 2012.
- [4] M. Bonilla, E. Farnioli, C. Piazza, M. Catalano, G. Grioli, M. Garabini, M. Gabicini, and A. Bicchi. Grasping with Soft Hands. In *proceedings of International Conference on Humanoid Robots 2014 IEEE-RAS*, pages 581–587, Madrid, Spain, Nov 2014. doi: 10.1109/HUMANOIDS.2014.7041421.
- [5] R. Deimel and O. Brock. A novel type of compliant, underactuated robotic hand for dexterous grasping. In *proceedings of Robotics : Science and Systems*, pages 1–9, Berkeley, USA, Jul 2014.
- [6] S. G. Nurzaman, F. Iida, C. Laschi, A. Ishiguro, and R. Wood. Soft robotics [tc spotlight]. *IEEE Robotics Automation Magazine*, 20(3) :24–95, Sept 2013. ISSN 1070-9932. doi: 10.1109/MRA.2013.2279342.
- [7] Thalmic Labs. Gesture control armband, Mar 2016. URL <https://www.myo.com/>.
- [8] R. Tapu, B. Mocanu, and E. Tapu. A survey on wearable devices used to assist the

- visual impaired user navigation in outdoor environments. In *2014 11th International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC)*, pages 1–4, Nov. 2014.
- [9] O. D. Lara and M. A. Labrador. A survey on human activity recognition using wearable sensors. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 15(3) :1192–1209, Third quarter 2013. ISSN 1553-877X.
- [10] Fitbit flex TM. *Wireles Activity + Sleep Wristband*. Fitbit [®], 2016.
- [11] K. M. Diaz, D. J. Krupka, M. J. Chang, J. Peacock, Y. Ma, J. Goldsmith, J. E. Schwartz, and K. W. Davidson. Fitbit [®] : An accurate and reliable device for wireless physical activity tracking. *International Journal of Cardiology*, 185 :138–140, Mar. 2015.
- [12] G. Pomboza-Junez and J. A. Holgado-Terriza. Control of home devices based on hand gestures. In *Consumer Electronics - Berlin (ICCE-Berlin), 2015 IEEE 5th International Conference on*, pages 510–514, Sep. 2015.